

温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究

松 野 健*・永 田 豊**

1. はじめに

温排水の拡がり域は、原子力発電所の増設などに伴い、近年大規模化する傾向にある。広範囲に拡がった温排水の振舞いについて議論する際、地球自転の効果を考慮する必要がある。今まで温排水の拡がりを問題とした水理的また数値的研究の数は非常に多いが、これらの中で地球自転の効果について論じたものはほとんどない。確かに、現実には複雑な沿岸流や海浜流等の影響が強く、地球自転効果は温排水の拡がりに必ずしも第一義的に現われてはいない。しかし、例えば福島第1原子力発電所の場合、北側に放出された温排水が北へ延びるときに比べ、南側に放出されたものが南へ延びるときの方が岸に沿った形になる傾向も認められており、この理由の一つとして地球自転の効果が考えられる。

地球自転を考慮した低密度水の流入に関する問題としては、Takano¹⁾が慣性項の無視できる場合について単純化したモデルを用い、解を求めている。 $R(=fL^2/A_h)$ をパラメーターとして、 R の大きい方が右への片寄りが大きいという結果を得ている。また Minato²⁾は岸近くの暖水の振舞いについて、外力の形が変わった場合、地衡流調節がどのように異なってくるかを isostacy を仮定した線形モデルで論じている。

本論文では三次元レベルモデルを用いた数値実験を行うことにより、地球自転を考慮した時の温排水の拡がりについて調べた。なおここでは、海域に流入した低密度水に対して地球自転がどのような影響を及ぼすか、その基本的な性質を調べることを目的とするため、海浜流他の海域の流れを無視した。

2. 数値モデル

数値実験に用いたモデルは、図-1 に示すように、海底が平坦な場合(F-type)と、岸に平行な海底斜面をもつ場合(S-type)の二通りを考えた。放水口の北4km、南8km、沖合4kmとし、水平的には矩形の海である。こ

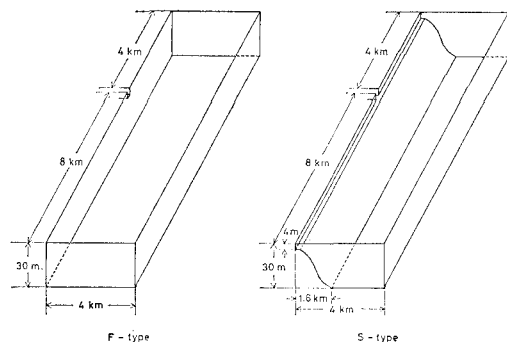


図-1 計算に用いたモデル

こで方位に物理的意味はないが、便宜上放水口から沖に向かって右を南とする。水深は F-type の場合全領域で 30m, S-type の場合には幅 1.6km の斜面をもち、岸側では深さ 4m, 沖合では F-type と同じく 30m である。

計算には静水圧近似、ブシネスク近似の仮定を用い、運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - fv \\ &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h F^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + fu \\ &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h F^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \end{aligned}$$

ここで、

$$F^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

また連続の方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

である。ここで、 x, y, z はそれぞれ東向き、北向き、鉛直下向きにとり、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速である。 p は圧力、 ρ は密度で、 ρ_0 は基本場の密度、ここでは 1 g cm^{-3} とした。また f はコリオリのパ

* 正会員 理修 (財)電力中央研究所 土木研究所環境部
(財)海洋生物環境研究所から出向

** 正会員 理博 東京大学教授 理学部地球物理学科

ラメーター ($=2\Omega \sin \phi$; Ω は地球自転の角速度, ϕ は緯度) で, $0.88 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ ($\phi \sim 37^\circ$) とした. A_h, A_v は水平方向, 鉛直方向の渦動粘性係数でそれぞれ $10^5 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, $10 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, また g は重力加速度で 980 cm sec^{-2} とした.

計算時間の効率化のため表面非発散 (rigid lid) の仮定をおいた. これは表面に生じる重力波を抑えたものであるが, 密度差によって生じる圧力場は評価されている. ここでは温排水の拡がりに対する重力波の影響については考えていないので, この仮定は対象としている現象を大きく左右するものではないと考えられる. ただ, 放水口から海域に流入した流量と同じ流量が沖側の境界から流出するようになっているため, 流出流速は微小であるが, 境界の影響について考慮する必要がある. この点については後に述べる.

熱については密度として次式の関係があると仮定し, 直接密度の方程式を用いた. なお, 塩分については全領域で一様であると考えて無視した. 密度の方程式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = K_h \nabla^2 \rho + K_v \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}$$

である. ここで K_h, K_v は水平方向, 鉛直方向の渦動拡散係数でそれぞれ $10^4 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, $1 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ とした. 放水口と東側の境界を除く各境界で断熱とし, 大気との間の熱交換を無視した. ここでは温排水の定常的な拡がり域を求めることを目的としていない.

上記の方程式を基本式とし, 差分に変換して数値積分を行った. 数値積分には Bryan³⁾ の考え方を用い, 基本的には Sugimoto⁴⁾ のモデルと同じである. 格子間隔は水平方向 200m, 鉛直方向には表面から 2, 2, 2, 3, 5, 8, 8m の 7 層とした.

計算は密度一様で静止した海域に密度差のない水を徐々に注入することによって始め, 1 時間後に所定の流量に達したのち放出する水に徐々に密度差を与え, さらに 1 時間後に密度差が $10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ になるようにした. この値は 33‰, 15°C 前後の海水にあてはめると約 5°C の差になる. その後は放水条件には変動がないものとする.

3. 結 果

(1) 地球自転の有無による相違

海底が平坦なケースについて行った $f=0$ の場合 (F-0) と $f \neq 0$ の場合 (F-2) の結果を図-2 に示す. 両者の放出条件は等しく, 放出流量: $Q_0=80 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$, 放出流速: $v_0=30 \text{ cm sec}^{-1}$ とした. 図は計算開始 48 時間後の第 1 層および第 2 層の密度場と流速場である. $f=0$ の場合には, 密度場, 流速場とも放水口を中心に南北対称な分布になっているのに対し, $f \neq 0$ の場合には密度場は明らかに南に偏した分布になっており, 流速場もそれに伴って南北非対称になっている. この密度分布より,

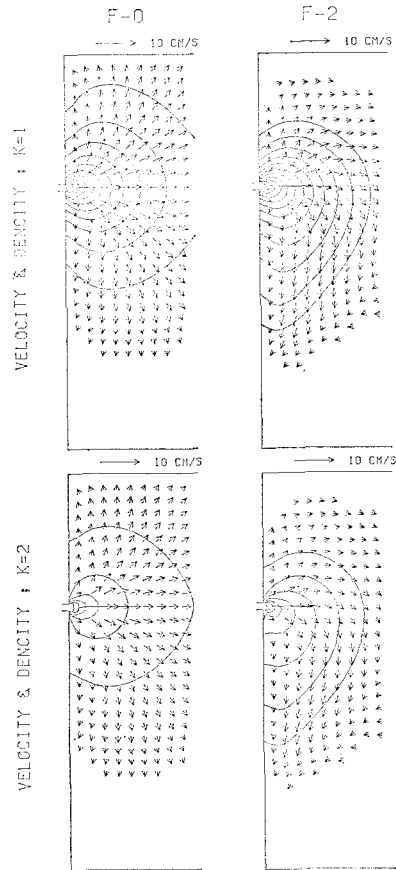


図-2 $f=0$ (F-0) と $f \neq 0$ (F-2) の場合の 48 時間後の密度場と流速場. 上図は第 1 層, 下図は第 2 層. (等密度線は $0.05 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ 間隔, 以下同じ)

地球自転の効果は密度差の小さい部分の沖合への拡がりを抑え, また第 2 層における拡がりを大きくしている, すなわち温排水層を深くしているのがわかる. さらに流速ベクトルは, $f=0$ の場合, 等密度線とほぼ直交する方向を向いているのに対して, $f \neq 0$ の場合には暖水側を右に見て等密度線に沿う傾向が見られる. 地衡流バランスをしているとは言えないが, 地衡流調節の起っていることがわかる.

このように地球自転の有無は温排水の拡がりに明瞭な相違をもたらす. 海底斜面を入れたケースについても, 定性的にはほぼ同様の結果が得られている.

(2) 地球自転の効果について—海底が平坦な場合— a) $Q_0=240 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$, $v_0=30 \text{ cm sec}^{-1}$ の場合 (F-3)

地球自転の効果によって温排水の拡がり域はどのような挙動をするか, まず海底が平坦な場合の一例を取りあげて, その基本的性質を見ていく. 図-3 に $Q_0=240 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$, $v_0=30 \text{ cm sec}^{-1}$ の場合の第 1 層について, 計算開始後 12 時間ごとの密度場および流速場の時間変化を示す. 等密度線は $0.05 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ 間隔で示してある. 時間とともに南への拡がりが大きくなり, 非対称性が増

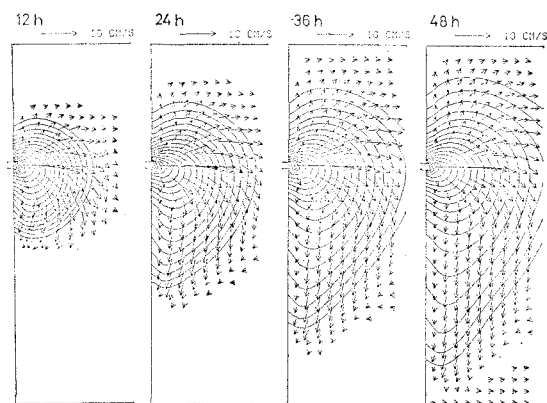


図-3 F-3 の場合の密度場, 流速場の時間変化

大していくのがわかる。また、拡がりの南端付近で等密度線の間隔がやや密になっているのが認められる。図-4 に岸から 600 m の距離の南北断面における密度分布の時間変化を示す。0.05 および 0.1×10^{-3} の等密度線は南端で垂直に近くなっており、かつ上述のように両者の間隔は狭くなっている。すなわち南端ではフロント状になる傾向にある。一方北端およびより密度差の大きい等密度線ではこの傾向は認められない。

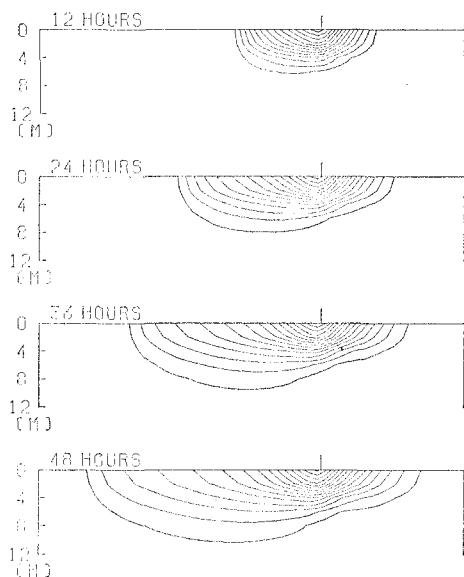
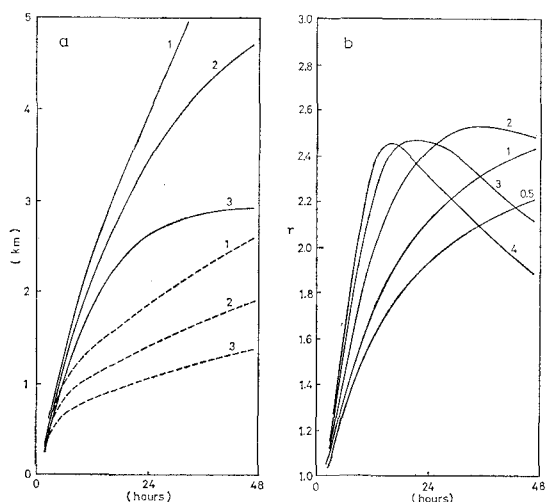


図-4 沖合 600 m の鉛直断面における密度分布の時間変化 (F-3)

第1層のいくつかの等密度線について、その南端および北端の位置の時間変化を示したものが図-5 (a) である。これは放水口の位置を基準とし、等密度線の南端および北端は各格子点の密度の値を用いて二次曲線補間で決めた。各等密度線の南端と北端の岸からの距離は時間とともに変化するが、その変化の割合はしだいに小さくなる。また、南端の位置に比べて北端の位置の方が沖合

図-5 等密度線 (図中の数字は $\times 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$) の a: 南端 (実線), 北端 (破線) の時間変化, および b: r の時間変化 (F-3)

にあるということが一般的に言える。

南への伸びは、 0.2 , $0.2 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ の等密度線と 0.3×10^{-3} の等密度線とは大きく異なっているのがわかる。密度差の小さい部分は時間とともに南へ伸び続けるのに対して、密度差の大きい部分はある時間が経つとほとんど伸びなくなっている。一方、北への伸びでは各等密度線とも、伸びる速度は異なるが、同じような傾向で伸び続けている。0.3 の等密度線の場合、計算開始 30 時間以後で北への伸びより南への伸びの方が遅くなっている。

温排水の拡がりの非対称性の指標として、各等密度線の北端の位置 (a) に対する、南端の位置 (b) の比 $r (=b/a)$ を考える。図-5 (b) に r の時間変化を示す。密度差の大きい等密度線ほど早い時間に r は最大となり、0.1, 0.05×10^{-3} では 48 時間後も r は増大を続けている。また r のピーク値は各等密度線の間に大きな相違がない。

b) 放出流速, 流量の異なる場合

海底が平坦な場合の 3 ケース (F-1, F-2, F-3) について、計算開始後 48 時間の第 1 層の密度分布を図-6 に示す。 Q_0 , v_0 は表-1 の通りである。

表-1 各ケースの放出流量と放出流速

ケース	F-0	F-1	F-2	F-3	S-2
放出流量 ($\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$)	80	80	80	240	80
放出流速 (cm sec^{-1})	30	10	30	30	30

F-1 と F-2 を比較すると、密度差の小さい等密度線の拡がりではあまり相違がないが、密度差の大きい部分の拡がり域は放出流速の小さい F-1 の場合に大きくなっている。等密度線の南端および北端の位置の時間変化

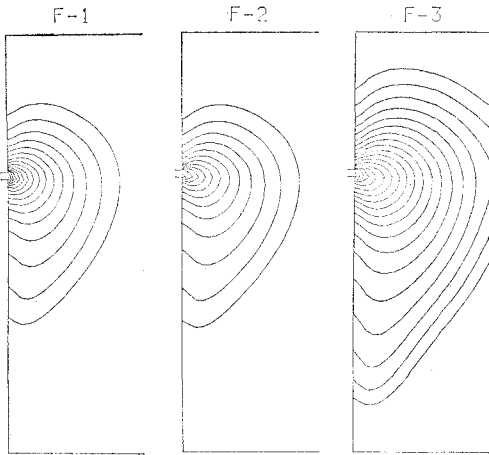


図-6 48時間後の第1層密度場の比較

を 図-7 (a) に示す。 0.1×10^{-3} の等密度線の南への延びはわずかに F-2 の方が大きい、その相違は小さい。また $0.2, 0.3 \times 10^{-3}$ の南への延びは F-1 の方が大きく、その差は 0.3×10^{-3} の方が大きい。一方北への延びは各等密度線とも F-1 の方が大きく、その差は密度差の大きい方が多少大きい。放出流速の大きい場合の方が、特に密度差の大きい領域で拡がりが小さくなっているのは、流速の大きい時は下層からの連行加入も大きくなるためである。

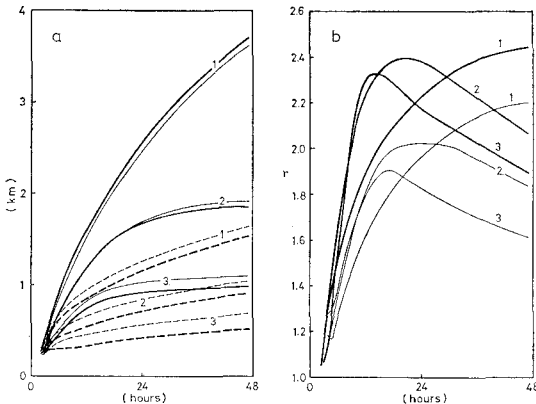


図-7 F-1 (細線), F-2 (太線) の比較 (他は 図-5 と同様)

図-7 (b) に r の時間変化を示す。 0.2 および 0.3 の等密度線については、F-1, F-2 とともに 20 時間前後のところで r は最大となっており、そのピークは F-2 の場合の方が早く現われている。また、 r の値は各等密度線とも放出流速の大きい F-2 の方が大きい。

放出流速を固定し、放出流量を変えたケース F-2 と F-3 を比較する (図-5 (b), 7 (b)) と、 r の値は放出流量の大きい F-3 の場合の方が $0.2, 0.3 \times 10^{-3}$ の等密度線について多少大きくなるが、流速を 3 倍にした F-1, F-2 の差に比べ、流量を 3 倍にした、F-2, F-3 の差は

小さい。ただ r のピークの位置は F-3 の方がかなり遅くなる。

(3) 地球自転の効果—海底斜面がある場合—

岸に沿って一様な海底斜面のある場合について、海底が平坦な場合と比較しながら検討する。 $Q_0 = 80 \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$, $v_0 = 30 \text{ cm sec}^{-1}$ で海底斜面のある S-2, および海底が平坦な F-2 について、等密度線の先端の位置の時間変化を 図-8 (a) に、また r の時間変化を 図-8 (b) に示す。 0.1×10^{-3} の等密度線の南への延びは両者間の相違がほとんどない。それに対して、 0.3×10^{-3} の南への延び、および各等密度線の北への延びは海底斜面の有無によって大きく異なる。海底斜面のある S-2 の方がより遠方まで延びているのがわかる。密度差の小さい部分の南への延びについては海底斜面に無関係なメカニズムが、また、密度差の大きい部分、および北への延びに関しては海底斜面に依存するメカニズムが大きな役割を果たしていると考えられる。

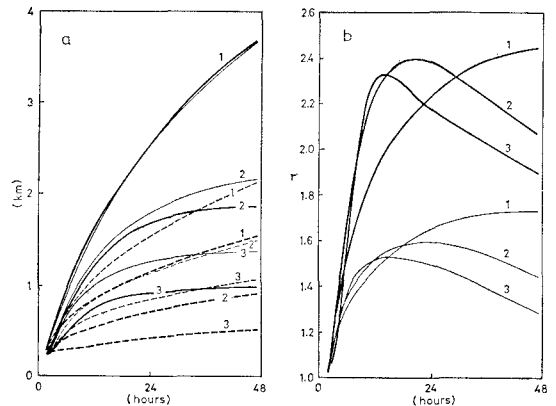


図-8 F-2 (太線), S-2 (細線) の比較 (他は 図-5 と同様)

また、 r の値はこのことを反映して、F-2 に比べて S-2 の方が大幅に小さくなっている。すなわち、現実により近い、海底斜面のある場合の方が地球自転による非対称の度合は小さく現われる。また、 r が最大になる時間は両者の間にほとんど差がないと言える。

4. まとめと論議

周辺流の影響を無視した場合、温排水の拡がりは地球自転の効果によって左右非対称な形状となり、その比率は海底斜面のある場合に比べて海底が平坦な場合の方が大きい。密度差の小さい部分 (低温領域) では、その非対称は少なくとも計算開始後 48 時間までは時間とともに増大するが、密度差の大きい領域では 20 時間前後に非対称は最大となる。この時間は地球自転に関する代表的な時間スケール $2\pi/f$ ($=19.8h$) に近いことが注目される。

ここで用いたモデルは南北に固定壁を設け、沖合を開

境界としたが、その境界条件の影響が上述の結果にどのような影響を与えているかを調べるため、海底斜面のある場合について計算領域を x, y 方向ともに2倍にしたモデルで計算を行った。その結果、温排水の振舞いは小さい計算領域の場合とほぼ一致し、境界の近傍まで拡がった部分を除けば、境界の影響は無視できると考えられる。

今後は水槽実験(道田, 永田²⁾)との比較も考慮して、より長時間計算を続行したときの温排水の拡がりについて検討していく必要がある。

最後に、本研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記するとともに、計算機の使用に際して援助頂いた理化学研究所宇野木早苗主任研究員ならびに長島秀樹博士に感謝の意を表する。なお本研究は筆者の

ひとりが(財)海洋生物環境研究所在勤中に実施されたものである。

参 考 文 献

- 1) Takano, K.: A complementary note on the diffusion of the seaward river flow off the mouth, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 11, pp. 147~149, 1955.
- 2) Minato, S.: Geostrophic response near the coast, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 39, pp. 141~149, 1983.
- 3) Bryan, K.: A numerical method for the study of the circulation of the world ocean, J. Comput. Phys., Vol. 4, pp. 347~376, 1969.
- 4) Sugimoto, N.: Coastal upwelling: onshore-offshore circulation, equatorward coastal jet and poleward undercurrent over a continental shelf-slope, J. Phys. Oceanogr., Vol. 12, pp. 272~284, 1982.
- 5) 道田 豊, 永田 豊: 温排水の拡がりに関する回転水槽実験II, 1982年度日本海洋学会講演要旨集, pp. 78~79, 1982.